

光敏可调的多波段电磁诱导透明超材料分析

李广森, 延凤平*, 王伟, 乔楠

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 设计了一种基于光敏半导体砷化镓的主动式电磁诱导透明超材料。砷化镓的光电特性使该超材料结构中的外围圆环能在各个光照条件下响应不同频率的电磁波;其与中心开口环耦合,分别能够在 1.47 THz 与 0.7 THz 两个频点处产生强烈的电磁诱导透明效应。通过调节光照强度来改变砷化镓的电导率,并拆分表面金属环结构进行对比,分析了该超材料结构的光敏性能与其实现多波段电磁诱导透明效应的物理机理;同时研究了砷化镓宽度、中心开口环开口大小与基底厚度对电磁诱导透明效应的影响。仿真结果表明,该超材料结构能够在不同光照条件下,于太赫兹波段的多个频点处产生高强度的波速迟滞效应,并伴随较高的折射率灵敏度,在太赫兹缓存器件与折射率传感领域有一定的应用价值。

关键词 材料;电磁诱导透明;多波段;可调谐;太赫兹迟滞效应;折射率传感

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0114002

Analysis of Photosensitive Tunable Multiband Electromagnetically Induced Transparency Metamaterials

Li Guangsen, Yan Fengping*, Wang Wei, Qiao Nan

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract An active electromagnetically induced transparency (EIT) metamaterial is designed based on photosensitive gallium arsenide. The photoelectric characteristics of gallium arsenide make the peripheral circular closed loop (PCCL) in a metamaterial structure respond to electromagnetic waves with different frequencies under different illumination conditions. It is coupled with its central split ring resonators (CSRRs) and thus a strong EIT effect is produced at two frequencies of 0.7 THz and 1.5 THz. The conductivity of gallium arsenide is changed by adjustment of light intensity, and the structures of surface metal rings are dismantled and compared. The photosensitivity of this metamaterial structure and the physical mechanism for the realization of a multiband EIT are analyzed. At the same time, the influences of gallium arsenide width, CSRRs opening size and substrate thickness on EIT are investigated. The simulation results show that this metamaterial structure can be used to achieve a strong hysteresis effect at multiple frequency points and simultaneously a relatively high refractive index sensitivity in the terahertz frequency range under different illumination conditions. It has certain application value in the fields of terahertz buffer devices and refractive index sensing.

Key words materials; electromagnetically induced transparency; multiband; tunable; terahertz hysteresis effect; refractive index sensing

OCIS codes 160.3918; 300.6495; 230.5750; 280.4788s

1 引 言

太赫兹波是指频率在 0.1 ~ 10 THz 的电磁波^[1],其介于微波与远红外波之间。太赫兹脉冲具

有光子能量较低、信噪比较高等特性,被广泛应用于宽带通信、医学成像等领域。然而多数自然界材料难以对其直接响应,因此如何制作性能良好的太赫兹器件、仪器已成为目前的研究热点之一。

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-09-01; 录用日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61827818,61620106014)

* E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

超材料^[2-3]是一种人工复合的非自然材料,通常呈周期性分布,通过合适的材料组合及单元形状布置,能够具备某些天然材料难以达到的超常电磁特性,如近零折射率^[4-5]、光子禁带^[6-7]、超导效应^[8-9]、电磁诱导透明(EIT)^[10-11]等。

传统的原子领域^[12]实现 EIT 效应时,通常要求强光抽运^[13]等严苛的实验条件,而利用超材料实现 EIT 效应时,仅需要谐振吸收频率相近的明、暗模式结构^[14],当电磁波入射时,二者能够相互耦合,从而产生透射峰^[15]。随 EIT 效应一并出现的波速延时^[16]、高折射率感应^[17]等电磁性质使该类超材料被广泛应用于太赫兹缓存^[18]、折射率传感^[19]等领域。2010年, Kim 等^[10]设计的由双金属圆环构成的超材料结构,能够在太赫兹波段产生尖锐的 EIT 透射峰。2012年, Wang 等^[20]通过非对称的等离子体波导结构,在微波波段实现了 EIT 效应,该结构能够在特定频率产生较强的慢光效应。以上对于超材料的研究,均采用了具有固定形状、特性的被动式结构。相对地,利用相变材料或石墨烯材料可以设计出主动式超材料结构^[21],其能够在不改变超材料形状参数的情况下,通过调节温度、电压或光照等外界条件,实现对 EIT 效应的动态调谐。2009年, Zhao 等^[22]选择基于铁电物质的超材料结构进行实验,通过 Mie 共振作用实现了微波波段的 EIT 效应,其频率受外界温度调节,可实现主动控制。2017年,曹妍妍等^[23]选择 T 型石墨烯作为超材料的明、暗模式结构进行耦合,能够在太赫兹波段产生强烈的 EIT 效应,并通过添加外置偏压,调节石墨烯的费米能级,进而主动控制 EIT 效应的透射峰出现位置与强度大小。在多数主动式超材料结构中,一般将能够响应外界条件的半导体材料作为完整的明、暗模式,单独作用于入射电磁波,但其电导率相对金属仍较弱,对整体结构的性能影响较小。

针对上述问题,本文设计了一种基于光敏半导体^[24-25]砷化镓(GaAs)的主动式超材料结构,其中砷化镓仅作为组成外围完整圆环的部分,根据光照强度的不同,起分割或连接金属作用。基于有限积分法(FIT)^[26-27],通过 CST Microwave Studio 电磁仿真软件进行分析,结果表明,当电磁波入射时,外围圆环(PCCL)能够在不同的光照条件下,与中心开口环(CSRRs)相互耦合,在太赫兹波段分别实现相应频点的 EIT 效应。通过对比中心开口外环、内环以及不同光照强度下外围圆环的单独谐振耦合结果以及对边缘效应的探讨,分析了该 EIT 现象产生的

基本原理,并研究了砷化镓宽度、开口环的开口大小与基底厚度对 EIT 透射峰强度的影响。在此基础上,对该超材料结构的光速延时与折射率灵敏度特性进行了仿真分析。相较于传统的 EIT 结构,所提结构能够在不同的光照条件下分别实现对应波段的 EIT 效应,且均能于多个频点处产生明显的波速迟滞效应,并具备较高的折射率灵敏度。

2 EIT 超材料的结构设计

光线照射光敏半导体时,其价带电子吸收光子能量,跃迁至导带,形成空穴-电子对,可使半导体的导电性能大幅提升,逐渐“金属化”,此时,入射光的波长需满足波长极限:

$$\lambda \leq \frac{1240}{E_g}, \quad (1)$$

式中: λ 为极限波长,单位为 nm; E_g 为禁带宽度,单位为 eV。只有入射光波长小于或等于极限波长时,其光子能量才足够激发半导体的价带电子跃迁,产生光电效应。砷化镓的禁带宽度约为 1.4 eV,根据(1)式,其催化光波长 ≤ 885 nm,即频率 $f \geq 338$ THz,属于红外光。因此,当频率为 0.1~10 THz 的太赫兹波入射时,并不会诱发砷化镓半导体产生光电效应。

所设多波段 EIT 超材料需要另外添加红外光源,以实现光敏可调的性能,其结构如图 1 所示。单元周期 $p=100$ μm ,由石英基底、金属铜与半导体砷化镓构成。石英基底主要起支撑固定作用,厚度 $a=30$ μm ,介电常数 $\epsilon=3.75$ 。外围圆环外径 $d_1=96$ μm ,宽 $w_1=5$ μm ,厚 $t_1=3$ μm ,由电导率 $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m 的金属铜与砷化镓组成,其中砷化镓宽度 $v_1=12.5$ μm 。中心开口环由外、内两个铜金属环组成,其宽度均为 $w_2=3$ μm ,厚度 $t_2=3$ μm ,开口距离 $v_2=5$ μm ,其中外环的外径 $d_2=45$ μm ,内环的外径 $d_3=26$ μm 。外加电、磁场分别垂直、平行于中心开口环的开口方向,太赫兹电磁波入射方向与石英基底表面垂直。

3 仿真结果及分析

3.1 多波段 EIT 仿真分析

砷化镓半导体的电导率与光照强度呈正相关,根据文献[28],当光照强度从 0 逐渐增加至 60 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时,砷化镓中越来越多的价带电子吸收能量,跃迁至导带,进而形成空穴-电子对,其电导率 σ 从 0 迅速增加至 10^6 S/m。故仿真分析中,可将光

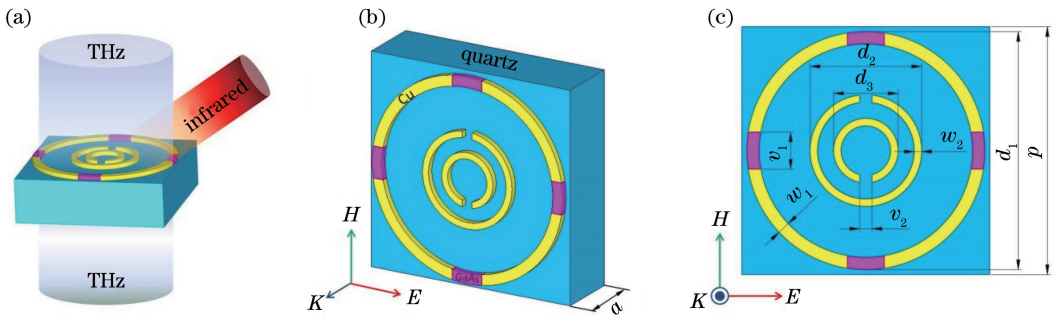


图 1 超材料的示意图。(a)电磁波入射；(b)三维单元结构；(c)截面

Fig. 1 Schematic of metamaterial. (a) Incidence of electromagnetic waves; (b) 3D unit structure; (c) cross section

照强度作为调节参数之一。为研究所设计的超材料结构实现多波段 EIT 效应的产生原理,利用 CST Microwave Studio 电磁仿真软件对图 1 所示的完整结构、去掉中心开口外环结构与去掉中心开口内环结构,分别在不同光照强度及砷化镓电导率的条件下进行仿真,结果如图 2 所示。由图 2(a)、(b)可知,当无红外催化光照射、砷化镓的电导率 $\sigma=0$ 时,完整结构与去掉中心开口外环的结构均能够在频率为 1.47 THz 附近产生强度约 0.73 的 EIT 透射峰,说明此时第一个 EIT 透射峰是由外围圆环与中心开口内环相互耦合产生。随着红外催化光强度的逐渐增强,砷化镓电导率 σ

不断增大,原 EIT 透射峰强度逐渐减小,直至消失。如图 2(c)、(d)所示,当电导率增加至 $\sigma=10^4$ S/m 时,完整结构与去掉中心开口内环的结构均在频率为 0.7 THz 附近开始出现新的 EIT 透射峰;随光照强度及砷化镓电导率继续增大,该 EIT 效应逐渐增强,直至电导率 $\sigma=10^6$ S/m 时,产生强度分别为 0.52 和 0.65 的尖锐 EIT 透射峰,这说明此时第二个 EIT 透射峰是由外围圆环与中心开口外环相互耦合产生。相较于传统的单频点 EIT 超材料,所设计的超材料结构能够根据外加光照强度灵活调节 EIT 效应的透射峰出现位置,从而获得双波段的 EIT 透射峰。

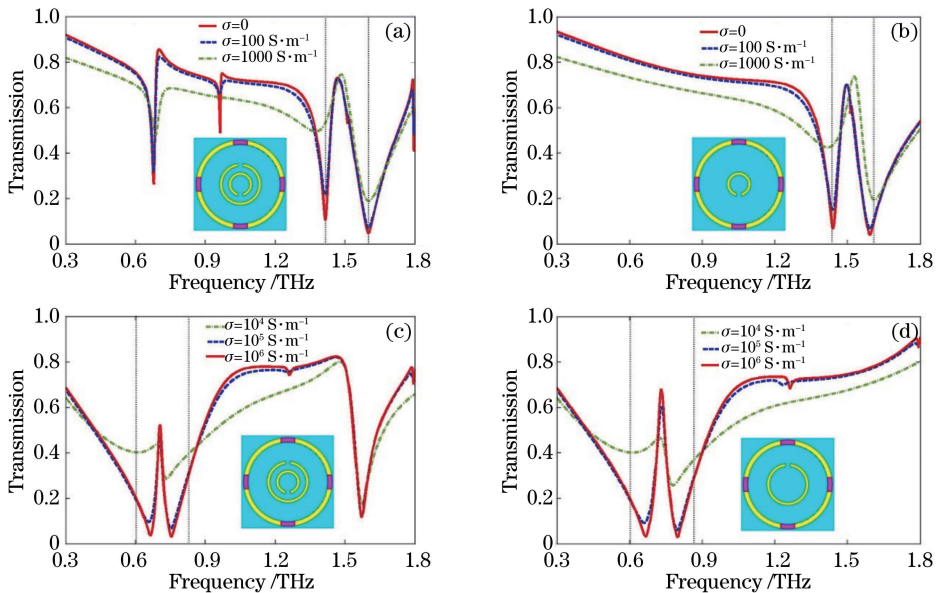


图 2 不同电导率时超材料结构的 EIT 效应。(a)(c)完整结构;(b) 去掉中心开口外环的结构;(d) 去掉中心开口内环的结构

Fig. 2 EIT effect in metamaterials with different electrical conductivities. (a)(c) Complete structures; (b) structure without external CSRR; (d) structure without internal CSRR

完整结构和分别去掉中心开口外、内环结构在不同光照强度及砷化镓电导率时的电磁场分布如图 3 所示。图 3(a)、(c)所示为完整结构与去掉中

心开口外环的结构在砷化镓电导率 $\sigma=0$ 时,频率为 1.47 THz 处的电场、磁场分布,可以看到,这两种结构具有相似的电场和磁场分布,即能量主要集中在

外围圆环的铜金属条部分以及中心开口内环附近,此时砷化镓近似绝缘体,几乎无法响应电磁波,外围圆环中仅4条圆弧与电磁波发生谐振作用。此外,能量更多地集中于中心开口内环附近,可见其作为明模式,当电磁波入射后与作为暗模式的外围圆弧发生强烈的电磁耦合作用,产生第一个高强度的EIT透射峰。图3(b)、(d)所示为完整结构与去掉

中心开口内环的结构在砷化镓电导率 $\sigma=10^6$ S/m时,频率为0.7 THz处的电场、磁场分布。此时这两种结构的能量均主要集中在外围圆环整体与中心开口外环附近,由能量分布可知,此时砷化镓明显“金属化”,其与4条圆弧相互连接,构成完整的外围圆环,并作为暗模式,与作为明模式的中心开口外环相互耦合,产生第二个EIT透射峰。

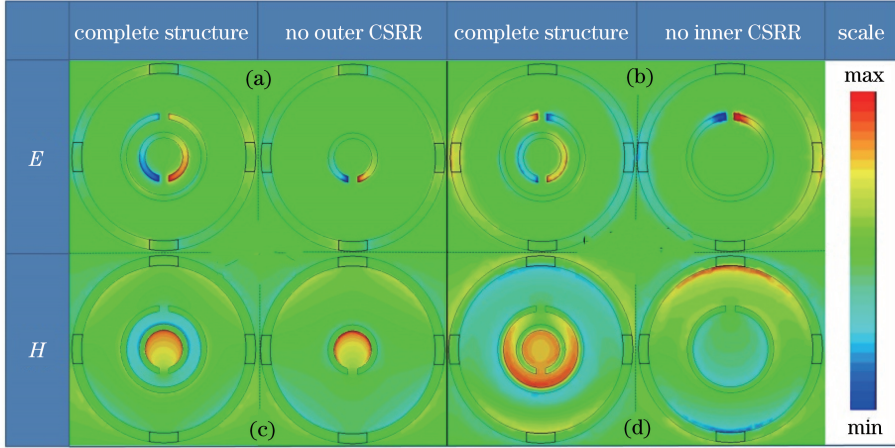


图3 超材料的电磁场分布;(a)(c) $\sigma=0, f=1.47$ THz; (b)(d) $\sigma=10^6$ S/m, $f=0.7$ THz

Fig. 3 Electromagnetic field distribution of metamaterial. (a)(c) $\sigma=0, f=1.47$ THz; (b)(d) $\sigma=10^6$ S/m, $f=0.7$ THz

3.2 EIT 形成原理分析

为进一步分析两个波段 EIT 效应形成的原理,拆分完整的超材料结构,分别进行仿真分析并相互对比,结果如图4所示。由图4(e)的电磁场分布及图4(a)的红色实线可知,外围圆环单独作用,在无红外光照射时,砷化镓电导率 $\sigma=0$,能量主要集中在4条金属圆弧附近,其与频率为1.49 THz的电磁波发生谐振吸收作用;当光照足够强,砷化镓电导率 $\sigma=10^6$ S/m,能量分布于整个圆环;当电磁波入射时,在频率为0.7 THz处产生谐振吸收谷,如图4(a)的蓝色虚线所示。考虑完整结构中的另一组成部分,即图4(b)所示的中心开口环结构,其内环与外环各自独立存在时,分别能与频率为1.43 THz和0.73 THz的电磁波发生谐振响应;当二者共同作用时,响应频率小幅移动,在1.51 THz与0.69 THz两处产生较外围圆环更加尖锐的吸收谷。因此,当外围圆环与中心开口环共同作用于电磁波时,与电磁波谐振更为强烈的中心开口环作为明模式,其与暗模式的外围圆环相互作用,共同影响入射电磁波。如图4(c)、(d)所示,当 $\sigma=0$ 时,开口内环与外围圆弧的谐振吸收频率相近,二者相互耦合,于1.47 THz处产生第一个EIT透射峰;当 $\sigma=10^6$ S/m时,开口外环的谐振频率与完整的外围圆

环相近,二者耦合,于频率为0.7 THz处产生第二个EIT透射峰。

由于所设超材料中外围圆环较靠近结构单元边界,故考虑相邻元胞间可能出现的相互作用,分析其边缘电、磁场分布(图5)。当 $\sigma=0$ 时,分别沿垂直、平行于开口环开口的电、磁场方向,该结构相邻元胞间外围圆环的电、磁场能量均呈单元规律性强、弱分布,可见元胞间的外围圆环存在相互谐振作用,其与中心开口环耦合后,于1.47 THz处形成第一个EIT透射峰;同样地,当 $\sigma=10^6$ S/m时,相邻元胞间外围圆环相互谐振,与中心开口环耦合后,于0.7 THz处形成第二个EIT透射峰。

3.3 EIT 超材料结构参数仿真分析

EIT效应的实现通常需要明、暗模式结构的相互耦合,为分析该超材料结构的相关参数对EIT透射峰的影响,首先考虑作为暗模式的外围圆环中砷化镓的宽度 v_1 。调节参数 v_1 从 $5 \mu\text{m}$ 递增至 $15 \mu\text{m}$,分别观察电导率 $\sigma=0$ 与 $\sigma=10^6$ S/m对应的EIT效应曲线的变化规律,仿真结果如图6所示。当 $\sigma=0$ 时,砷化镓近似绝缘体,在外围圆环中起分割作用,其宽度变化会造成外围铜金属圆弧的弧长发生改变,从而影响电磁波的谐振效果。如图6(a)所示,当砷化镓宽度 $v_1=5 \mu\text{m}$ 时,作为明、

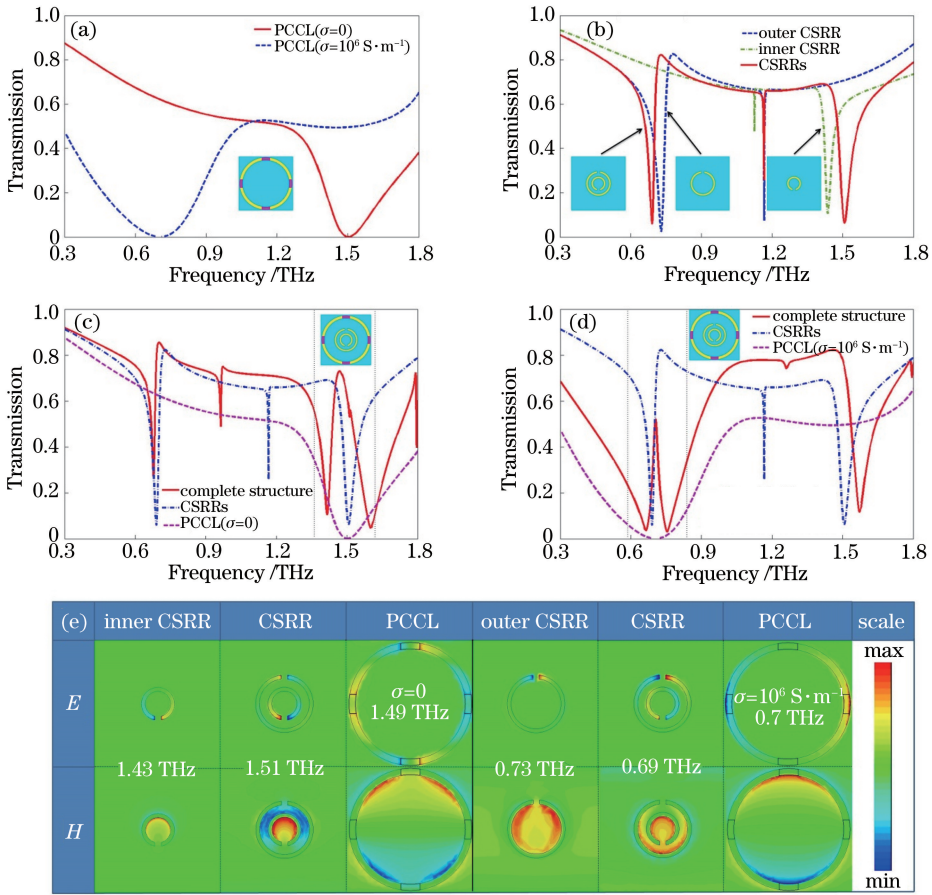


图 4 拆分单元结构的电磁响应。(a)外围圆环的谐振响应；(b)中心开口环整体与部分的谐振响应；

(c) $\sigma=0$ 时完整结构的 EIT 效应；(d) $\sigma=10^6 \text{ S/m}$ 时完整结构的 EIT 效应；(e) 各分解结构的电、磁场分布

Fig. 4 Electromagnetic response of split cell structure. (a) Resonant response of PCCL; (b) resonant response of complete and part of CSRRs; (c) EIT effect of complete structure for $\sigma=0$; (d) EIT effect of complete structure for $\sigma=10^6 \text{ S/m}$; (e) electromagnetic field distributions in various decomposed structures

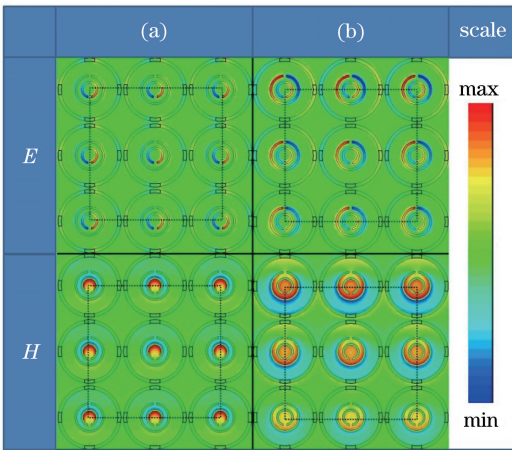


图 5 超材料结构边缘电、磁场分布。(a) $\sigma=0, f=1.47 \text{ THz}$;

(b) $\sigma=10^6 \text{ S/m}, f=0.7 \text{ THz}$

Fig. 5 Electromagnetic field distributions at the edge of metamaterial. (a) $\sigma=0, f=1.47 \text{ THz}$;

(b) $\sigma=10^6 \text{ S/m}, f=0.7 \text{ THz}$

暗模式的中心开口环与外围圆环谐振频率分别为

1.58 THz与 1.19 THz, 相差较大, 二者难以相互耦合形成 EIT 透射峰; 随着砷化镓宽度的增大, 明、暗模式谐振频率逐渐靠近, 二者开始电磁耦合, 产生 EIT 效应; 当 $v_1=12.5 \mu\text{m}$ 时, 该结构于 1.47 THz 处形成的 EIT 透射峰强度达到最大值 0.73; 继续增大 v_1 , EIT 透射峰强度开始减弱。相应地, 当 $\sigma=10^6 \text{ S/m}$ 时, 砷化镓“金属化”, 外围圆环起连接两边金属圆弧的作用, 使之成为一个完整的圆环结构; 而此时在一定范围内调节砷化镓宽度 v_1 , 并不会影响外围圆环的完整性及其电磁特性。如图 6(b) 所示, v_1 从 $5 \mu\text{m}$ 递增至 $15 \mu\text{m}$ 的过程中, 于 0.7 THz 处形成的 EIT 透射峰几乎并未发生变化。可见砷化镓宽度的变化主要影响 $\sigma=0$ 时超材料结构的 EIT 效应, 当 $v_1=12.5 \mu\text{m}$ 时, 超材料结构的 EIT 效应达到最佳效果。

与暗模式耦合作用的明模式, 即中心开口环中, 开口距离 v_2 对 EIT 效应的影响如图 7 所示。当 $\sigma=$

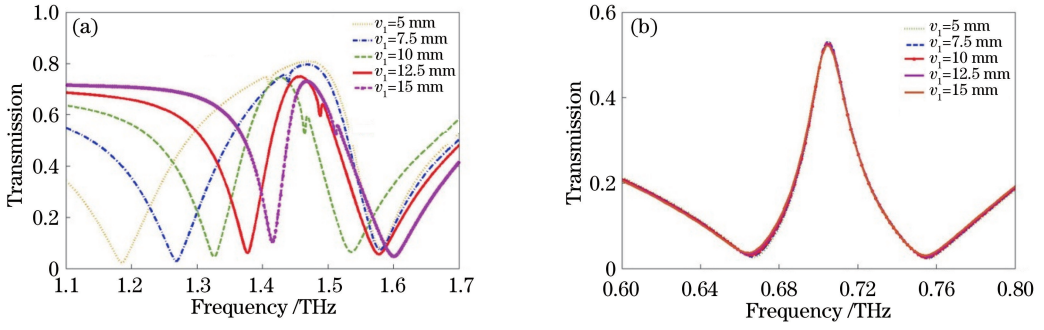


图 6 不同电导率时,砷化镓宽度对 EIT 效应的影响。(a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=10^6$ S/m

Fig. 6 Influence of GaAs width on EIT effect under different electrical conductivities. (a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=10^6$ S/m

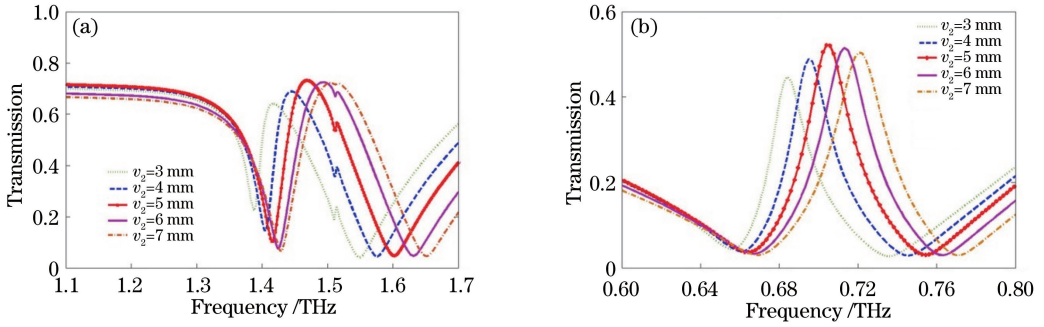


图 7 不同电导率时,开口环的开口距离对 EIT 效应的影响。(a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=10^6$ S/m

Fig. 7 Influence of CSRR opening distance on EIT effect under different electrical conductivities. (a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=10^6$ S/m

0 时,在开口距离 v_2 从 $3 \mu\text{m}$ 逐渐增大至 $7 \mu\text{m}$ 的过程中,由外围圆环与中心开口环耦合产生的 EIT 透射峰逐渐蓝移,强度先增加后减小;当 $v_2 = 5 \mu\text{m}$ 时,于 1.47 THz 处形成的透射峰峰值强度达到最大值 0.73 。同样地,当 $\sigma = 10^6 \text{ S/m}$ 时,随着 v_2 的增加,所产生的 EIT 透射峰小幅蓝移,强度先增强后减弱,并在 $v_2 = 5 \mu\text{m}$ 时,于 0.7 THz 处达到最大值 0.52 。可见中心开口环的开口距离 v_2 在 $\sigma = 0$ 与 $\sigma = 10^6 \text{ S/m}$ 两种情况下,均能有效地影响所形成的 EIT 透射峰,并当 $v_2 = 5 \mu\text{m}$ 时,二者皆达到最优效果。

石英基底厚度 a 的影响。故适当调节该结构参数,分析其与 EIT 效应的关系,结果如图 8 所示。当 $\sigma = 0$ 时,在基底厚度 a 从 $30 \mu\text{m}$ 逐渐增大至 $150 \mu\text{m}$ 的过程中,由中心开口内环与外围圆环于 1.47 THz 处耦合产生的 EIT 透射峰强度略微减弱,并整体小幅红移;当 $\sigma = 10^6 \text{ S/m}$ 时,随着基底厚度 a 的增加,由中心开口外环与外围圆环于 0.7 THz 处耦合产生的 EIT 透射峰小幅红移,其强度逐渐降低。可见在两种电导率条件下,当石英基底厚度 $a = 30 \mu\text{m}$ 时,所设计的超材料结构形成的 EIT 透射峰强度更强,效果最佳。

EIT 效应的形成,除明、暗模式外,还可能受到

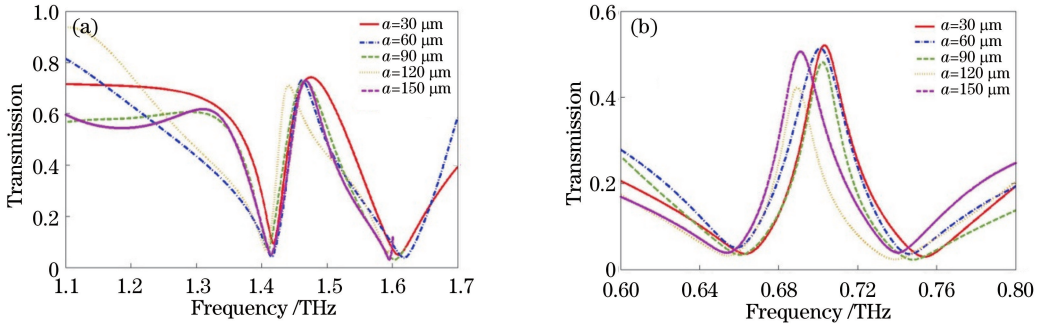


图 8 不同电导率时,基底厚度对 EIT 效应的影响。(a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=10^6$ S/m

Fig. 8 Influence of substrate thickness on EIT effect under different electrical conductivities.

(a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=10^6$ S/m

4 EIT 超材料的应用分析

4.1 太赫兹缓存

实际应用中,分析某束电磁波的波速,多考虑其群速度。而波包群速度的大小则受其通过介质的群折射率影响,群折射率 n_g 越大,群速度越小。为研究所设计的超材料结构的波速迟滞特性,通过 CST Microwave Studio 电磁仿真软件计算得到所设计的超材料结构在电导率 $\sigma=0$ 与 $\sigma=10^6$ S/m 时的散射参数 (S 参数)曲线,进而考虑其与折射率 n 的关系^[29]:

$$n = \frac{1}{Kd} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right], \quad (2)$$

式中: $K=2\pi/\lambda$ 为电磁波波数; d 为介质厚度; S_{21} 、 S_{11} 分别为电磁波的透射系数和反射系数。利用 S 参数反演算法计算并分别绘制该超材料结构在两种电导率条件下的折射率曲线,并根据 $n_g = n + \omega \cdot dn/d\omega$ (ω 为角频率)得到该超材料的群折射率曲线

如图 9 所示。图 9(b)中,当 $\sigma=0$ 时,伴随中心开口外环的谐振作用与明、暗模式耦合引发的 EIT 效应,该超材料结构的折射率急剧变化(蓝色虚线),对应的群折射率(红色实线)迅速升高,在 0.73 THz 与 1.59 THz 处群折射率分别能够达到 105.2 与 160.5。图 9(c)中,当 $\sigma=10^6$ S/m 时,由于外围圆环电磁特性的变化,该超材料结构产生 EIT 效应的频点为 0.7 THz,而 1.58 THz 处出现由中心开口内环谐振而成的吸收谷;在此情况下,超材料结构的折射率变化明显,相应的群折射率分别达到 184.7 与 156.4[图 9(d)]。两种电导率条件下,4 个峰值群折射率均高于文献[16]所设计的结构的 102.3,迟滞效应更加强烈。同时,对比传统超材料结构,所设计的光敏可调多波段 EIT 结构在不同光照条件下均具有多个强迟滞延时频点;且可根据 3.3 节中开口环的开口距离等参数灵活调节其透射峰出现位置,更具实际应用价值。

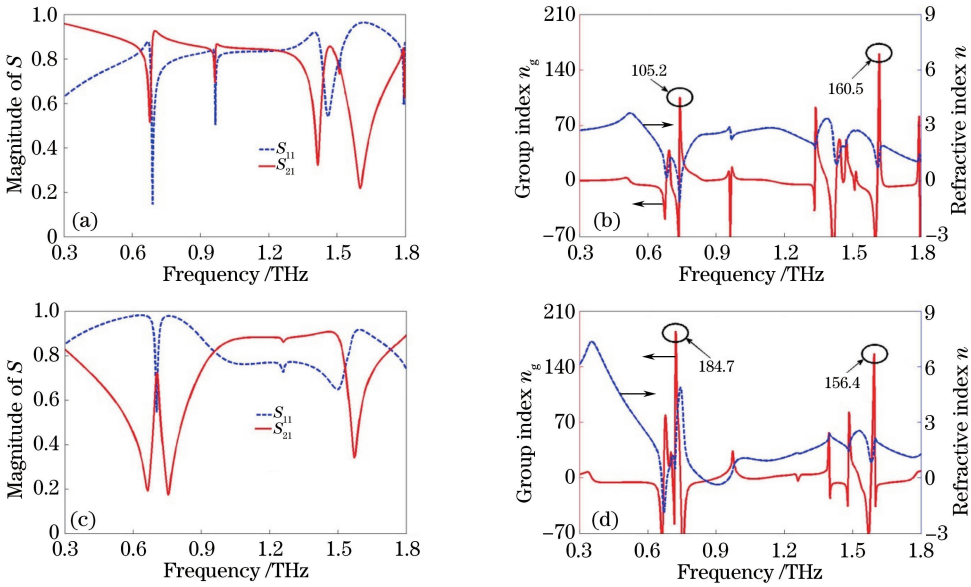


图 9 S 参数和群折射率随频率变化的曲线。(a) $\sigma=0$ 时 S 参数随频率变化的曲线;(b) $\sigma=0$ 时折射率及群折射率随频率变化的曲线;(c) $\sigma=10^6$ S/m 时 S 参数随频率变化的曲线;(d) $\sigma=10^6$ S/m 时折射率及群折射率随频率变化的曲线

Fig. 9 S parameter and group index versus frequency. (a) S parameter versus frequency for $\sigma=0$; (b) refractive index and group index versus frequency for $\sigma=0$; (c) S parameter versus frequency for $\sigma=10^6$ S/m; (d) refractive index and group index versus frequency for $\sigma=10^6$ S/m

4.2 折射率传感器

EIT 效应的产生通常会导致超材料的色散急剧升高,使其对周围介质折射率的变化更加敏感。为研究所设超材料结构在折射率传感领域的应用,分别拟合其在砷化镓电导率 $\sigma=0$ 与 $\sigma=10^6$ S/m 时在不同折射率介质中的透射率曲线,如图 10 所示。在图 10(a)、(b)中,当 $\sigma=0$ 时,随着周围介质的折射

率变化,该结构于左侧 0.49~0.68 THz、中间 0.67~0.96 THz 和右侧 1.07~1.47 THz 三个波段分别形成可作为折射率感应点的两个吸收谷和一个 EIT 透射峰,其折射率灵敏度分别可达到 0.19、0.29、0.40 THz/RIU (RIU 为单位折射率)。当 $\sigma=10^6$ S/m 时, EIT 效应及折射率灵敏度曲线如图 10(c)、(d)所示,伴随周围介质折射率变化,该结

构于左侧 0.53~0.7 THz 波段形成 EIT 透射峰,于右侧 1.11~1.57 THz 波段形成吸收谷,二者均可作为折射率感应点,灵敏度分别达到 0.22 THz/RIU 与 0.46 THz/RIU。在该电导率条件下,当折射率 $n=2$ 时,左侧的 EIT 透射峰消失,说明该波段作为折射率传感的理想监测范围为 $n \in [1, 2)$ 。综合两

种电导率情况下的折射率感应点,其中所设计结构的 80% 的灵敏度均高于文献[17]所设计结构的灵敏度 0.228 THz/RIU。与传统 EIT 超材料相比,本文所设计结构在不同光照条件下均具有多个可作为折射率传感的波段,覆盖频域较宽,且均具备较高的灵敏度。

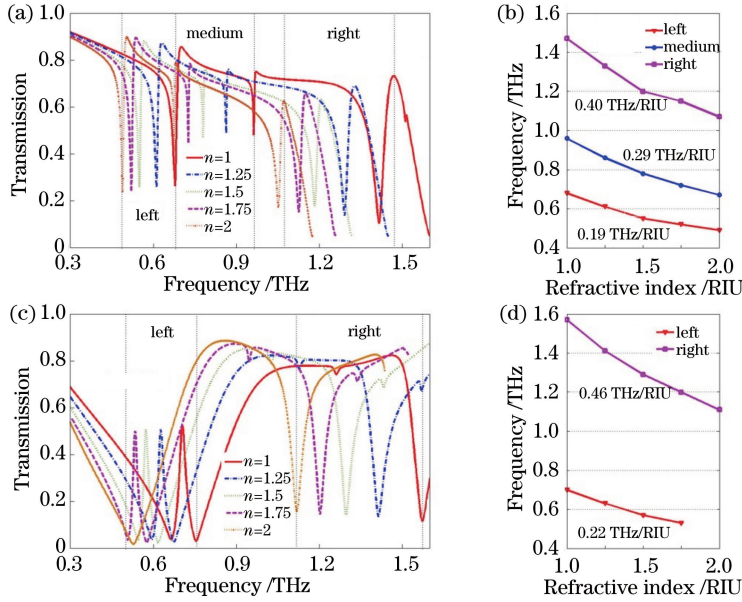


图 10 超材料对折射率变化的灵敏度。(a) $\sigma=0$ 时不同折射率介质下的 EIT 曲线; (b) $\sigma=0$ 时超材料的折射率灵敏度; (c) $\sigma=10^6$ S/m 时不同折射率介质下的 EIT 曲线; (d) $\sigma=10^6$ S/m 时超材料的折射率灵敏度

Fig. 10 Sensitivity of metamaterial to variation of refractive index. (a) EIT curves of materials with different refractive indexes for $\sigma=0$; (b) refractive index sensitivity for $\sigma=0$; (c) EIT curves of materials with different refractive indexes for $\sigma=10^6$ S/m; (d) refractive index sensitivity for $\sigma=10^6$ S/m

5 结 论

利用半导体砷化镓的光电特性,设计出一种光敏可调的超材料结构,实现了其在不同光照条件下的差异化 EIT 效应。当无红外光照射时,砷化镓的电导率 $\sigma=0$,该结构于 1.47 THz 处产生强度为 0.73 的 EIT 透射峰;当 $\sigma=10^6$ S/m 时,该结构能于 0.7 THz 处产生强度为 0.52 的 EIT 透射峰。通过对比去除中心开口外、内环与完整结构下的透射率曲线,分析了该结构在不同光照下分别实现两个波段 EIT 效应所需的明、暗模式结构。通过对超材料结构边缘效应的分析以及明、暗模式结构的拆分讨论,研究了双波段 EIT 效应形成的物理机理;通过调节结构参数,讨论了超材料中砷化镓宽度、中心开口环的开口距离与基底厚度对 EIT 强度的影响。研究表明,相比于传统结构,所设计的多波段 EIT 超材料结构可实现光敏可调,根据光照条件的变化,分别能在多个频点产生更加强烈的波速迟滞

效应,并具有更高的折射率灵敏度,能够有效地应用于太赫兹缓存、折射率传感等领域。

参 考 文 献

[1] Tao H, Bingham C M, Pilon D, *et al.* A dual band terahertz metamaterial absorber [J]. Journal of Physics D, 2010, 43(22): 225102.

[2] Kussow A G, Akyurtlu A, Angkawisittpan N. Optically isotropic negative index of refraction metamaterial[J]. Physica Status Solidi B, 2008, 245 (5): 992-997.

[3] Gingrich M A, Werner D H. Synthesis of low/zero index of refraction metamaterials from frequency selective surfaces using genetic algorithms [J]. Electronics Letters, 2005, 41(23):1266-1267.

[4] Sun H H, Yan F P, Tan S Y, *et al.* Simulation analysis on design of permeability-near-zero terahertz metamaterials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0614001.

孙慧慧, 延凤平, 谭思宇, 等. 磁导率近零太赫兹超

- 材料设计的仿真分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0614001.
- [5] Li Y, Liang B, Gu Z M, *et al.* Unidirectional acoustic transmission through a prism with near-zero refractive index[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(5): 053505.
- [6] Russell P S J. Photonic-crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4729-4749.
- [7] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.
- [8] Herzog C P. Analytic holographic superconductor [J]. Physical Review D, 2010, 81(12): 126009.
- [9] Maeda H, Tanaka Y, Fukutomi M, *et al.* A new high- T_c oxide superconductor without a rare earth element[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1988, 27: L209-L210.
- [10] Kim J, Soref R, Buchwald W R. Multi-peak electromagnetically induced transparency (EIT)-like transmission from bull's-eye-shaped metamaterial [J]. Optics Express, 2010, 18(17): 17997-18002.
- [11] Sun Y R, Shi T L, Liu J J, *et al.* Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0328001.
- [12] Zaccanti M, Deissler B, D'Errico C, *et al.* Observation of an Efimov spectrum in an atomic system[J]. Nature Physics, 2009, 5(8): 586-591.
- [13] Lancia L, Marquès J R, Nakatsutsumi M, *et al.* Experimental evidence of short light pulse amplification using strong-coupling stimulated brillouin scattering in the pump depletion regime[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(2): 025001.
- [14] Singh R, Rockstuhl C, Lederer F, *et al.* Coupling between a dark and a bright eigenmode in a terahertz metamaterial[J]. Physical Review B, 2009, 79(8): 085111.
- [15] Eggo R M, Scott J G, Galvani A P, *et al.* Respiratory virus transmission dynamics determine timing of asthma exacerbation peaks: evidence from a population-level model [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(8): 2194-2199.
- [16] Chiam S Y, Singh R, Rockstuhl C, *et al.* Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial[J]. Physical Review B, 2009, 80(15): 153103.
- [17] Tang Y Z, Ma W Y, Wei Y H, *et al.* A tunable terahertz metamaterial and its sensing performance [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(4):453-457.
- 唐雨竹, 马文英, 魏耀华, 等. 一种旋转可调的太赫兹超材料及其传感特性[J]. 光电工程, 2017, 44(4): 453-457.
- [18] Jang J K, Erkintalo M, Schröder J, *et al.* All-optical buffer based on temporal cavity solitons operating at 10 Gb/s[J]. Optics Letters, 2016, 41(19): 4526-4529.
- [19] Tian Z B, Yam S S H, Barnes J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(8): 626-628.
- [20] Wang W, Zhang L, Fang K, *et al.* Experimental study of EIT-Like phenomenon in a metamaterial plasma waveguide [J]. Advanced Electromagnetics, 2012, 1(3): 61-63.
- [21] Pitchappa P, Manjappa M, Ho C P, *et al.* Metamaterials: active control of electromagnetically induced transparency analog in terahertz MEMS metamaterial[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(4): 540-540.
- [22] Zhao Q, Zhou J, Zhang F L, *et al.* Mie resonance-based dielectric metamaterials[J]. Materials Today, 2009, 12(12): 60-69.
- [23] Cao Y Y, Li Y, Liu Y Z, *et al.* Tunable electromagnetically induced transparency based on T-shaped graphene metamaterials [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(2):192-197.
- 曹妍妍, 李悦, 刘元忠, 等. 基于 T 型石墨烯超材料可调电磁诱导透明效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2): 192-197.
- [24] Gochuyeva A F, Kurbanov M A, Khudayarov B H, *et al.* Photoresistive effect in the composites consisting of organic and inorganic photosensitive semiconductors[J]. Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures, 2018, 13(1):185-191.
- [25] Gao Y W, Zhang Y J, Chen D, *et al.* Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0330001.
- 高彦伟, 张玉钧, 陈东, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度测量研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0330001.
- [26] Jiao D, Lu M Y, Michielssen E, *et al.* A fast time-domain finite element-boundary integral method for electromagnetic analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(10): 1453-1461.
- [27] Wang Y, Lu Q P, Gao Y G. Impact of carbon contamination cleaning technologies on reflectivity of extreme ultraviolet lithography optics [J]. Chinese

- Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0303004.
- 王依, 卢启鹏, 高云国. 碳污染清洗工艺对极紫外光刻光学元件反射率的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0303004.
- [28] Fan Z F, Tan Z Y, Wan W J, *et al.* Study on ultrafast dynamics of low-temperature grown GaAs by optical pump and terahertz probe spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 087801.
- 樊正富, 谭智勇, 万文坚, 等. 低温生长砷化镓的超快光抽运-太赫兹探测光谱[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 087801.
- [29] Szabo Z, Park G H, Hedge R, *et al.* A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(10): 2646-2653.